

規格基準は事業者と規制をつなぐ技術者と行政のルール Standards and Guidelines should be Rules between Licensees and Regularly

北海道大学 奈良林 直 Tadashi NARABAYASHI Member

Abstract: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Pacific Earthquake and the Tsunami gave the serious damage to the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Plants (NPPs). The accidents occurred in Unit 1, 2, 3 and 4. It is said that the height of tsunami attacked Fukushima NPP was more than 14m. After 50 minutes from the automatic shut-down, tsunami attacked the NPPs in Fukushima Daiichi NPPs. For example, the Unit 1 lost A/C power caused the loss of water injection function; it made the core meltdown and unusual increase of PCV pressure in the midnight of March 11th to 12th morning. Though the Unit one has the Isolation Condenser Core Cooling system, it was stopped by the operator to keep the cooling rate of 55°C/h. Finally, the isolation signal was transmitted from the control room to the motor driven isolation valves when the control room's battery discharged. It was the initiation of the core meltdown. The lessons from the accidents, we should improve the nuclear safety regulation through the innovation of regulatory rules and safety standers. Standers and guidelines should be rules between licensees and regularly.

Keywords: 5-10key words, Times New Roman 10PT

1. 緒言

東京電力福島第一原子力発電所の1号機から4号機においては、①外部電源および非常用電源が全て失われたこと、②炉心および使用済燃料貯蔵プール内の燃料の冷却および除熱ができなくなったことが大きな要因となり、燃料が損傷し、その結果として放射性物質が外部に放出され、周辺に甚大な影響を与える事態に至った。原子力発電所の事故のみならず、地元から首都圏の水瓶まで放射性物質で汚染するという深刻な原子力災害を引き起こした⁽¹⁾⁽⁴⁾。商業用の原子力発電所で起こってはならない重大な事故であり、津波の被災に加えて強制退避が追い打ちを与える形で避難された方々、野菜や牛乳、漁業に与えた汚染と風評被害、さらには生き残った家畜の殺処分といった耐え難い状況が連日報道された。今回の事故で課題として上がっているのは、過酷事故対策が事業者の自主的取り組みになっていたり、非常用ディーゼル発電機が津波に対して無防備であったり、駆けつけた移動電源車の電圧やプラグが仕様と異なっていて使えなかったり、1号機に備わっていた隔離時復水器(IC: Isolation Condenser)の機能を十分に活かせなかったり、全交流電源喪失のなかで制御盤が隔離信号を出してICを隔離し、原子炉の水位低下とそれに伴う炉心損傷・炉心溶融を発生していることである。

福島原子力発電所の過酷事故の貴重な教訓と提言をもとに、技術者の倫理、規制の倫理、報道の倫理について改めて考えてみたい。

2. 福島第一原子力発電所の事故の要因

ICの出口弁を運転員が55°C/hで原子炉の冷却行う保安規定を順守しようとして、on/offを繰り返す、更に、全交流電源喪失のなかで制御盤がIC伝熱管の破損信号(誤信号)によりICの隔離信号を出して電動の隔離弁を自動閉止し、ICを隔離してしまった。この隔離動作は致命的で、1号機は冷却機能喪失に陥り、炉心損傷・炉心溶融(メルトダウン)といった過酷事故に進展した。もし、ICの機能を活かし切っていれば、1号機の冷却は確保され、ICプール(大気開放)への消防ポンプによる注水のみで事故は収束できたはずであることが当学会の事故調査報告書でまとめられている⁽¹⁾。この事故の初期段階は果たして運転員の責任であろうか。運転員は保安規定を順守していたのであり、この場合の技術者倫理は、ICの重要性を認識し、過酷事故時の運転訓練の重要性を見出していなかった発電所の幹部および、過酷事故対策の重要性を認識していなかった我が国の原子力界の技術者全員に責任がある。

1号機の炉心損傷により、多量に発生した水素爆発による原子炉建屋の破壊とそれに伴う放射性物質を含む瓦礫の飛散が、隣接する2号機、3号機の事故対応(アクシデントマネジメント)の遂行を困難にした。2号機は3日間、3号機は2日間の炉心注水を確保していたにもかかわらず、その間に消防ポンプによる炉心注水が開始できなかったために、2号機、3号機に於いても炉心溶融を発生し、3号機は激しい水素爆発を起こし、隣接する4号機も3号機から排気塔に行く排気管を経由して水

素が侵入し、水素爆発を発生したと判断された⁽¹⁾。炉心への注水に必要な移動電源車の到着が遅れ、消火ポンプの枝管の弁の閉止忘れや中央制御室への給電が遅れたことも事故を拡大させた。これは非常時の政府や関連行政庁との連携や対応に関する緊急対応手順の不備や、緊急時対応訓練が不十分であったことに依るものと多くの事故調で指摘している⁽²⁾。

チェルノブイリ 4号機の事故の後に欧州で設置されたフィルタードベントシステムが、もし福島第一発電所に設置されていれば、周辺への放射性物質の飛散を1/100から1/1000に低減でき、地元へ深刻な被害を与えなくて済んだはずである⁽³⁾。また、水素爆発のすさまじさは、フィルタードベントにおいても適切な水素対策が必要であることを教訓として残した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。原子力に携わる全ての技術者は、原子力施設が人体に有害で危険な放射能を取り扱う原子力施設であることをまず第1に認識し、深層防護の考え方にに基づき、環境への漏えい防止を最優先すべきである。

3. 安全規制の倫理と基準・規格類の適切な運用の重要性

過酷事故の拡大を防ぎ、事故の影響緩和に積極的に取り組むこと、それらのために必要な方策を準備することを過酷事故対応緩和措置（AM: Accident management）と呼ぶ。表1に示すようにTMI-2事故を契機とした基準等の見直しがなされたが、我が国では電気事業法⁽⁶⁾の精神、「物が健全であれば安全である」という構造強度偏重の考え方が根強く、機能評価やシビアアクシデントの解析には進まなかった。表2に示す。TMI-2事故やチェルノブイリ原発4号機の事故を契機にシビアアクシデント対策としてのアクシデントマネージメント（AM）や確率的リスク評価（PRA）導入についての検討がなされたが、安全審査で安全とされた原子力発電所⁽⁷⁾にあっては、事業者の自主的取り組みにしかならなかった。その後、東電問題と呼ばれるシュラウドや配管のSCCによる亀裂進展などから新たな保全プログラムによる品質保証制度が取り入れられたが、品質保証の考え方による細部までの詳細な検査記録の作成が求められ、4階建てのビルの高さに相当するような書類の作成とそのチェックが求められるようになった。表3に示すように、科学技術の知見に基づく合理的な検査を目的とする新検査制度により改善することになったが、品質保証制度による書類重視の制度はそのまま残り、本質的な安全のための抜本的な改善や

新しい知見を速やかに安全規制に取り込むことが依然として困難な状況にあった。

Table 1 Revision of safety standers after TMI-2 accident⁽⁴⁾

我が国の安全確保対策に反映させるべき事項(指針関係)	反映
安全設計審査指針及び関連技術基準 a. 安全上重要な系統及び機器の分類 b. 原子炉計測制御系及びプロセス計測制御の信頼性 c. 事故時に必要とされる系統及び機器 d. 緊急時中央指令所 e. 可燃性ガス濃度制御系 f. 制御室	重要度分類指針策定('90) 事故時の放射線計測指針策定(1981) 安全設計指針改訂('90)
安全評価審査指針 a. ヒューマン・クレジット及び単一故障 b. 運転時の異常な過渡変化及び事故の解析条件	安全評価指針改訂('90)
ECCS安全評価指針 小破断事象についても留意する必要がある	ECCS性能評価指針改訂(1981)

わが国では、電事法の精神、ものが健全であれば安全である、という構造強度偏重の考え方が根強く、機能評価、解析への転換までは進まなかった。

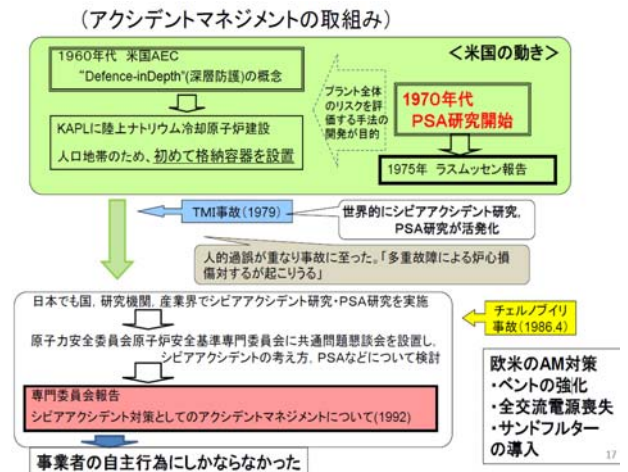


Fig.1 Revision of safety standers after Chemobyl accident

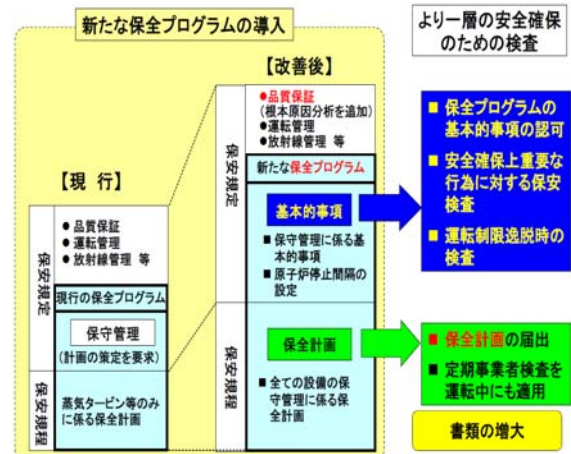


Fig.2 Increase of inspection document by QMS⁽⁴⁾

我が国の物作りを中心とする優秀な工業製品はTQCなどの品質改善運動によって発展したが、改善提案したもの

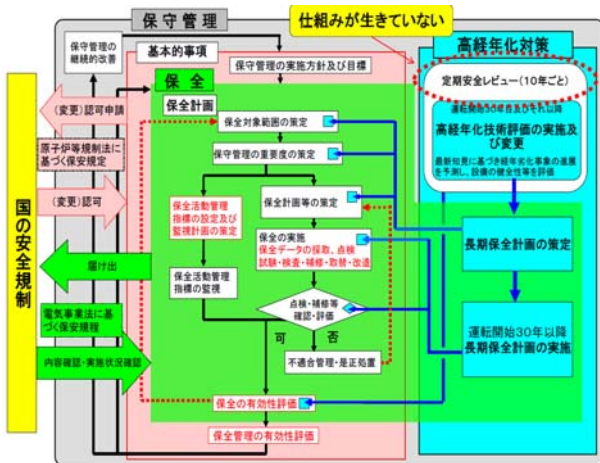


Fig. 3 Periodic safety review system for maintenance^[4]

が、保安規定になり、それが達成できない場合は保安規定違反として扱われるようになると、最新の知見に基づくチャレンジや改善が、原子力発電所の品質保証制度のもとでは提案されなくなる。誰もが自分で自分の首を絞めるようになりリスクになる提案をしなくなるのは当然である。書類の記載不備の制裁として原子力発電所が半年も停止されるようになると、品質保証制度で原子力発電所の設備利用率（品質の指標の1つ）が低下するという本末転倒の状況となり、これだけが原因ではないが、我が国の原子力発電所の設備利用率は世界最低のレベルに低下した。世界最高の計画外停止率を誇る我が国の原子力発電所がである。

米国では、原子力規制委員会（NRC）が原子力発電所の安全性の確保・良好な運転の責任を共有しており、発電所の運営を指導している（ROP: Reactor Oversight Program）。多くの改善提案が従業員から提案され、重要度分類に従って振り分けられ、これが是正処置（CAP: Corrected Action Program）として速やかに実施される。NRCの検査官はLANを介して経営と人事情報を除く発電所の全ての情報に事由にアクセスできる。発電所の現場にもいつでも自由に立ち入り、発電所の点検整備が適切に行われていることを確認できる。CAPは是正処置と訳されているが本質的には日本で行われているQC改善提案を組織として活かす仕組みである。かつて米国の原子力発電所の設備利用率は世界最低レベルであった。

NRCは徹底的に規制を厳しくしたが、設備利用率は低下するばかりであった。1980年代、NRCは当時世界最高の運転成績を誇った日本に調査団を送り、改善提案や安全第一などの日本の原子力発電所で行われていた良いところを学び、自国の安全規制に取り込んだ。2000年代に入

り、日米の安全規制とその実績としての設備利用率は逆転した。米国の規制を取り込んだ韓国も米国同様の高い設備利用率を達成し、海外の受注活動で有利に展開している。

我が国の安全規制体系は、3.11以前は表5に示すように多くの省庁に分散していた。表6のように、誰が責任を持っているのか、主たる責任を負うべき検査官が継続的にいつでもサイトで検査を行う権限を確保すべき、検査の種類や頻度を変更できるより柔軟なプロセスを確立すべきとIAEAが指摘していた。重箱の隅をつつくような規制ではなく、包括的な安全解析書や安全文書の作成と更新について、IAEAの安全基準がきちんと考慮されるように求めている。

Table 2 Nuclear regulatory system in japan before 3.11

	安全規制(Safety)		核拡散防止		Security
	事業/物質の安全規制	放射線安全	輸出入管理	保障措置 (Safeguard)	核セキュリティ
原子力委員会	平和利用、計画的遂行等の審査		政策審議	政策審議 ダブルチェック	政策審議 ダブルチェック
原子力安全委員会	政策審議、規制調査 指針、ダブルチェック等	政策審議 指針			
文科省	研究炉 RI施設等	放射線基準 (放射線審議会) モニタリング		保障措置	研究炉 RI施設等
経産省	実用炉 サイクル施設 廃棄物施設等		輸出入 管理業務		実用炉 サイクル施設 廃棄物施設等
外務省				国際交渉	国際交渉
厚労省	労働安全	健康影響			
国交省	輸送、船舶				
主な根拠法令	炉規法、電事法 労安法、RI法等	放射線障害防止の技術的基準に関する法律	外為法 貿易管理令 輸出令	炉規法	炉規法 放射線発散処罰法

Table 3 Recommendation for Japanese Nuclear safety regulation by IAEA^[4]

IAEAのIRRSの報告(2008年3月)
勧告9: 保安院は、日本の規制機関として安全規制および指針の作成とエンドースに主たる責任を負うべきである。(誰が責任者なのか?)
提言3: 保安院は事業者の間、相互の理解と尊重に基づいて、率直で隠し立てがなくそれでいてフォーマルな関係を育成しなければならない。(責任を分担すること)
提言5: 保安院は、特に、包括的安全解析書又は許認可の総体的根拠を要約する包括的安全文書の作成と更新について、現行IAEA安全基準がきちんと考慮されるように配慮を払うべきである。
提言6: 保安院は、運転安全計画(Operational safety program)の承認と定常運転の開始の前に、安全上重要な全ての要素の総合的評価を行うためのホールドポイントを設けるべきである。
提言7: 保安院は、検査官が継続的にいつでもサイトで検査を行う権限を確保すべきである。これにより検査官は、法律で規定された検査回数だけでなく、いつでも人々にインタビューし文書を求めるため、自由にサイトに立ち入ることができるようになる。これは建設および運転検査プログラムの両方に適用する。
提言14: 保安院は、法改正を行わずに検査の種類および頻度を変更できる、より柔軟なプロセスを確立すべきである。

図4は平成19年度の原子力安全基盤機構（JNES）の報告書である。平成19年度の段階で、福島第一原発のような津波に起因する炉心損傷のリスクや早期の電源復旧の必要性を指摘している。なぜ、原子力安全保安院から速やかに安全規制として全国の発電所の津波耐対策の必要

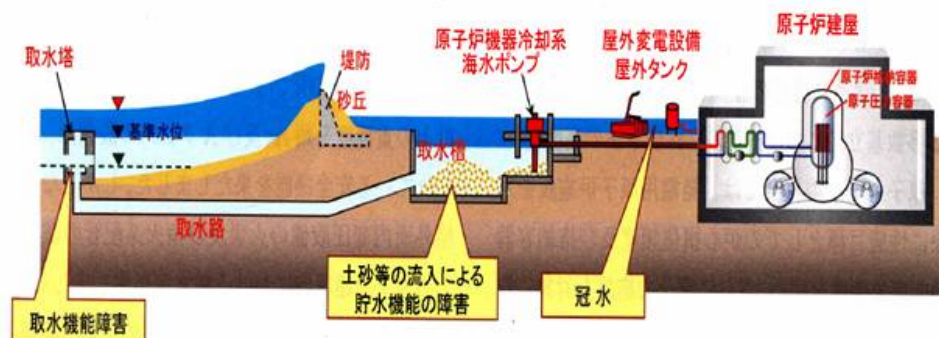


Fig.4 「地震 PSA の適用手順の整備と津波・地震起因火災 PSA 手法の高度化」(JNES 年報) ⑩

と示が出なかったのか？ なぜ、電力事業者が自主的取り組みとして屋外の変電設備や海水冷却系の電気品や非常用ディーゼル発電機の浸水対策に取り組まなかったのか？ 事業者の反省とともに、規制側の及び腰も反省事項と思う。原子力関係者全てが反省し、今後の緊張感を持った原子力の安全性確保に邁進すべきと思う。反対派を気にして適切な規制を行えない「規制が反対派の虜」になっていた。

4. チェルノブイリ事故時の情報汚染と報道の倫理

放射能の一番大きな被害は「一般国民に対するマスコミに報道による風評被害である」とウクライナの国立放射線医学病院の医師らが指摘している^⑥。人間が放射能を恐れるのは、①目で見えない、②簡単に測定できるが数値になじみがない。③強い放射能は人を殺すという恐怖心の3つの要素から、放射能は一般の方にとって「恐ろしい物」になっている。福島第一事故のあとでは、汚染のレベルが低くても、過剰な報道により、政府の諮問委員会も過剰な反応を示し、1mSvに下がるまで帰還できないという暫定基準値が作られ、人々が故郷に戻れず、仮設住宅で約1300人が命を落とす状況に陥った。過剰に恐怖を煽る報道がさらに過剰な恐怖と過度に低い規制値とそれによって被災者がさらに厳しい状況に追いやられる負の連鎖を産んだ。放射能を知識が乏しいために作り話や噂が過剰な反応を生み、精神的な被害が健康被害を生んでいる。もちろん高い放射能による被害は危険だが、低線量は危険でもないのに過剰な反応を生んでいる^⑥。情報汚染が鬱やアル中などの心の汚染を生んでいるというのがチェルノブイリの事故後のウクライナで発生し、そして25年の時間遅れで福島でも発生している深刻な事態である。マスコミ報道にも強い倫理観が必要である。

5. 結言

原子力安全を確保するためには、原子力安全の基本的考え方を明確にし、PRA やリスク評価を活用し、安全目標を設定すること、そして深層防護の考え方を正しく理解し、プラント設計、アクシデントマネジメント、防災等に適用することなど、取り組むべき課題は広範囲に亘る。規格基準は事業者と規制をつなぐ技術者と行政のルールであり、透明性のある規制はルールを明示して、そのルールの基に安全性の評価を行う必要がある。

文 献

- [1] 日本原子力学会事故調査委員会編、「日本原子力学会事故調査最終報告書」(2014.3)。
- [2] 奈良林 直、杉山憲一郎、東日本大震災に伴う原子力発電所の事故と災害～福島第一原子力発電所の事故の要因分析と教訓～、原子力学会誌、Vol.53、No.6、(2011)。
- [3] 東京電力、「東北地方太平洋沖地震発生当時の福島第一原子力発電所運転記録及び事故記録の分析と影響評価について(概要)」(2011.5.23)。
- [4] 宮野 廣、「福島第一原子力発電所の津波による被災—今回の事故の遠因はどこにあるか？」日本保全学会・北海道大学シンポジウム」(2011.8.9)。
- [5] 地震 PSA の適用手順の整備と津波・地震起因火災 PSA 手法の高度化、平成19年度原子力安全基盤機構年報、PP. 231-232 (2007)。
- [6] 西本由美子、吉田 憲一、「福島再生：子供たちのために」原子力の平和利用を促進する会シンポジウム講演予稿集II-2、(2013.11.27)。

軽水炉保全最適化のための統合型シミュレータ Dr. Mainte

Dr. Mainte: Integrated Simulator of Maintenance Optimization of LWRs

原子燃料工業株式会社	磯部	仁博	Yoshihiro ISOBE	Member
原子燃料工業株式会社	匂坂	充行	Mitsuyuki SAGISAKA	Member
原子燃料工業株式会社	江藤	淳二	Junji ETOH	Member
原子燃料工業株式会社	松永	嵩	Takashi Matsunaga	Member
株式会社アトリー	高坂	徹	Toru Kosaka	
株式会社アトリー	松本	聡司	Satoshi Matsumoto	
東京大学	吉村	忍	Shinobu YOSHIMURA	

Dr. Mainte, an integrated simulator for maintenance optimization of LWRs (Light Water Reactors) has been developed based on PFM (Probabilistic Fracture Mechanics) analyses. The concept of the simulator is to provide a decision-making system to optimize maintenance activities for representative components and piping systems in nuclear power plants totally and quantitatively in terms of safety, availability and economic efficiency, environmental impact and social acceptance. For the further improvement of the safety and availability, the effect of human error and its reduction on the optimization of plant maintenance activities and approaches of reducing it have been studied.

Keywords: Dr. Mainte, LWR, maintenance, optimization, PFM, simulation, human error

1. はじめに

著者らは軽水炉の主要機器・配管等を対象として、各種保全戦略（検査頻度、検査精度、抜取検査率、修理／取替の選択、維持規格の適用、長期サイクル運転等）が、①安全性、②信頼性、③経済合理性、④環境性、⑤社会的受容性に及ぼす影響を定量評価し、それら多角的な視点から保全戦略を総合的に最適化するための PFM(確率論的破壊力学)に基づく軽水炉保全最適化のための統合型シミュレータ Dr. Mainte を開発してきた[1]。

一方で、軽水炉保全作業のさらなる信頼性向上のためには、ヒューマンエラー低減の重要性が指摘されている。ここでは原子力発電所の配管を対象としたPFM解析ベースの保全最適化評価において、①ヒューマンエラーの影響とその低減効果（漏洩／破断確率、経済的コスト等）、②ヒューマンエラー低減の方策について検討した。

2. アプローチ

2.1 ヒューマンエラーの影響とその低減効果

ここではヒューマンエラーとして、「き裂深さに依存し

ない見逃し確率」の影響とその低減効果について、BWR 再循環系配管の検査を対象に検討した。詳細な PFM 解析条件については別文献に記すが[1]、**Fig.1 (a)** で ε が「き裂深さに依存しない見逃し確率」であり、米国における 1980 年代当時のデータから $\varepsilon = 0.005$ の値は、冷間加工されたオーステナイト系ステンレス鋼配管、並びにフェライト鋼配管についても妥当であるとされている。ここでは、 $\varepsilon = 0.005$ の値を、最小がその半分の 0.0025 から、最大がその 20 倍の 0.1 まで変化させることにより感度解析を行なった。解析結果の例として、**Fig.1 (b)** は 40 年運転期間中の累積リーク確率の推移を示す。また、経済性評価として **Fig.1 (c)** は 40 年運転期間中の単年度 NPV（現在正味価値）の推移を示す。

今回の解析条件の範囲内では、**Fig.1 (b)** より見逃し確率が $\varepsilon = 0.005$ から半分の $\varepsilon = 0.0025$ に低減されたとしても、累積漏洩確率にはほとんど影響を受けず、逆に 20 倍の $\varepsilon = 0.1$ となっても、運転 40 年目の累積漏洩確率において 2%程度の差異しか無かった。また **Fig.1 (c)** より見逃し確率の NPV への影響は限定的であった。理由としては検査精度が十分に高いため、ヒューマンエラーを考慮しても漏洩に至るまでにき裂の検出が可能となることによると考えられる。即ち、ヒューマンエラー低減の効果の高い項目の改善が重要となることがわかる。

連絡先: 磯部 仁博 〒590-0451 大阪府泉南郡熊取町
朝代西 1-950 原子燃料工業株式会社
E-mail: isobe@nfi.co.jp

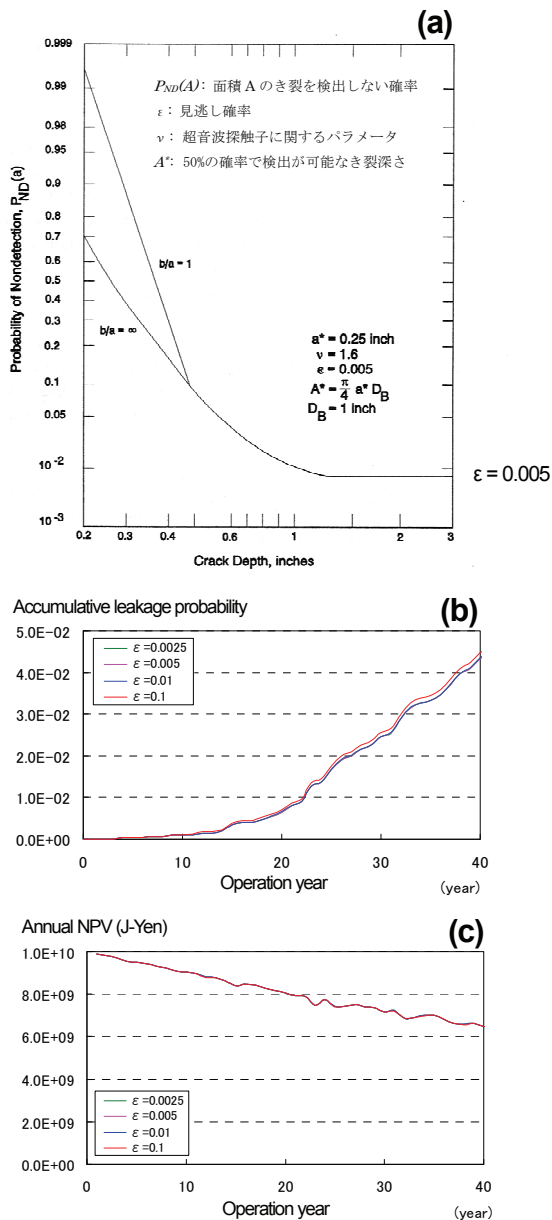


Fig.1 Effect of human error by PFM analysis.

- (a): Probability of Non-detection of UT.
- (b): History of accumulative leakage probability.
- (c): History of annual NPV (Net Present Value).

2.2 ヒューマンエラー低減の方策

ヒューマンエラーの発生比率は作業環境に大きく依存することはよく知られているが、我々は軽水炉保全最適化のための統合型シミュレータ Dr. Mainte の機能である「多次元可視化」と「ニューラルネットワーク」を用いて、作業環境を改善するためのアプローチと作業環境の改善効果の予測について検討した。以下にアプローチの概要を示す。

最初に、作業環境を規定する『設計変数』と作業者の作業環境に対する満足度を表す『目的関数』の因果関係を定量的に把握し、次に作業環境の改善効果を定量的に予測する。

Step ①: 作業者の満足内容 (『目的関数』) と、それを左右すると考えられる作業環境 (『設計変数』) を設問に含めたアンケート調査 (5段階評価) を実施。

Step ②: 「ニューラルネットワーク」を応用した非線形解析によって、『設計変数』と『目的関数』の因果関係を定量分析 (Fig.2)。

Step ③: 「多次元可視化」により、『設計変数』と『目的関数』の因果関係を視覚的に俯瞰しながら、インタラクティブな操作で作業環境の最適化について検討 (Fig.3)。

Step ④: さらに、『設計変数』と『目的関数』の因果関係を学習した「学習済ニューラルネットワーク」により、作業環境の改善効果 (『設計変数』の改善による『目的関数』への影響) を定量予測。

アンケート調査と結果の分析により、ヒューマンエラーの発生比率に大きく影響を与えるとされる作業環境の改善効果について定量的に予測し、その結果、作業環境の効率的な改善が期待される。

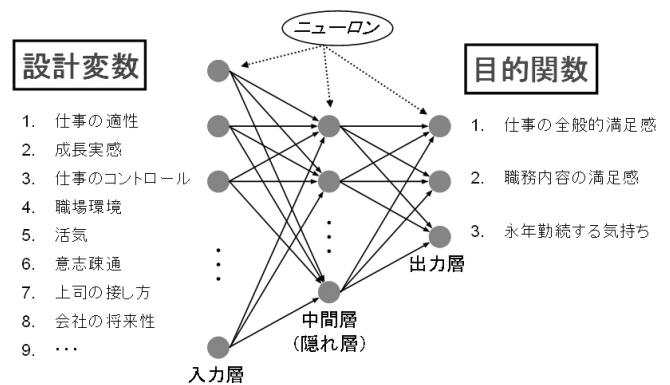


Fig.2 Learning questionnaire results by neural network.

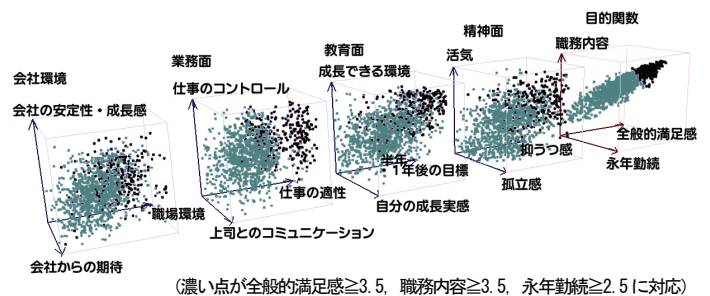


Fig.3 Multi-dimensional visualization of questionnaire results.

参考文献

- [1] 吉村忍, 他 “軽水炉保全最適化のための統合型シミュレータ Dr. Mainte の開発,” 日本原子力学会和文論文誌, Vol. 9, No. 2 (2010).